

$$\begin{aligned}
& - \frac{\mu_2(t)}{2D_p} + \frac{1}{4\pi} \int_0^t \frac{x_k(t) - x_o(\tau)}{[D_p(t-\tau)]^{\frac{3}{2}}} \cdot e^{-\frac{[x_k(t) - x_o(\tau)]^2}{4D_p(t-\tau)}} \cdot \mu_1(\tau) \cdot d\tau + \\
& + \frac{1}{4\pi} \int_0^t \frac{x_k(t) - x_k(\tau)}{[D_p(t-\tau)]^{\frac{3}{2}}} \cdot e^{-\frac{[x_k(t) - x_k(\tau)]^2}{4D_p(t-\tau)}} \cdot \mu_2(\tau) \cdot d\tau = \mu_2(t), \quad (8)
\end{aligned}$$

где $\mu_1(t) = B[x_o(t), t]$, $\mu_2(t) = B[x_k(t), t]$.

Система уравнений (7) и (8) является системой интегральных уравнений типа Вольтерра. Решением уравнения (1) является выражение (3) совместно с решением (6). Это решение справедливо для произвольного вида переменного напряжения на р-п переходах транзистора. Имея решение (3), легко получить выражения для дырочных составляющих коллекторного и эмиттерного токов транзистора.

Список использованных источников

1. Спиридонов Н. С., Вертоградов В. И. Дрейфовые транзисторы. Изд. «Советское радио», 1964.
2. Тихонов А. Н., Самарский А. А. Уравнения математической физики. Изд. «Наука», 1977.

УДК 539.216

ВЫБОР УСТРОЙСТВА ДЛЯ СНЯТИЯ ПРОФИЛЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУР ПО ДЛИНЕ ПЛЕНОЧНОГО ПРОВОДНИКА

Архипов В.А., Кривошеев К.Е., Архипов А.В.

Проблема контроля качества пленочного проводника на этапе отладки технологического процесса формирования металлической пленки является актуальной задачей. Для реализации методики диагностирования электродиффузионных и ряда других отказов нужно контролировать профиль распределения температур по длине пленочного проводника. Отсюда возникает необходимость выбора принципа контроля и устройства способного решить поставленную задачу. При ее решении абсолютное значение температуры не представляет интереса. Нас интересует изменение температуры перегрева пленочного проводника относительно подложки. Можно сказать, что точность измерения также не очень важна. Важно, чтобы вносимая процессом измерения погрешность была постоянной. Измеряемая температура, предположительно, будет колебаться от

20°C до 200°C. Площадь, с которой будет сниматься температура, желательно, не должна превышать 10 мкм.

Все известные в настоящее время способы измерения температуры объектов можно разделить на контактные и бесконтактные. Причём бесконтактные приборы для измерения температуры имеют значительные преимущества перед контактными. Бесконтактные приборы способны измерять температуру с точностью, недостижимой при обычном контактном методе измерения. Это позволяет точнее контролировать ход процесса независимо от материала и состояния поверхности. Измерения температур малых объектов контактным способом может привести к искажению температуры в точке измерения. Одним из главных достоинств бесконтактных устройств является отсутствие влияния измерителя на температурное поле нагретого тела, так как в процессе измерения они не вступают в непосредственный контакт друг с другом. Кроме того, в условиях поставленной задачи необходимо регистрировать различия в температуре близко расположенных микрообластей поверхности объекта. Контактные методы подразумевают физический контакт между приемником и излучателем, что может привести к деформации пленки, а это не допустимо. Решение данной задачи просто невозможно при использовании контактных методов измерения температуры.

Действие всех бесконтактных приборов для измерения температуры основано на измерении той или иной характеристики теплового излучения. Все существующие пирометры (устройства для бесконтактного измерения температуры) классифицируются по типам:

- пирометры суммарного излучения (ПСИ) – измеряется полная энергия излучения;
- пирометры частичного излучения (ПЧИ) – измеряется энергия в ограниченном фильтром (или приемником) участке спектра;
- пирометры спектрального отношения (ПСО) – измеряется отношение энергии фиксированных участков спектра.

Пирометры спектрального отношения сразу можно исключить из рассмотрения по следующей причине. Действие таких пирометров связано с измерением цветовой температуры, то есть с измерением излучения в двух, удалённых друг от друга областях спектра. Чтобы различие энергий фиксированных участков спектра было значительным, температура излучающего объекта должна быть сравнительно высока (при использовании приёмника из антимонида индия - выше 100°C). Следовательно, данный тип пирометрических устройств не подходит для измерения относительно низких температур, и выбор оптимального устройства для решения поставленной задачи следует производить из группы энергетических пирометров суммарного или частичного излучения.

При помощи энергетических пирометров излучения температуру определяют непосредственно по спектральной частичной или общей энергетической яркости объекта измерения или сравнением энергетических яркостей объекта измерения и эталонного излучателя. Сравнение энергетических яркостей в свою очередь может осуществляться автоматически при помощи приёмников излучения или, если измерение проводится в видимой области спектра, субъективно, то есть при помощи глаза наблюдателя.

В исследовательской технике (в частности в простых лабораторных устройствах) наиболее часто применяются так называемые субъективные (оптические) пирометры сравнения, к которым относятся, к примеру, полутеневого пирометр Ваннера, яркостной оптический пирометр с исчезающей нитью, пирометр с нейтральным клином и многие другие устройства. Несомненным достоинством пирометров этого типа является относительная простота исполнения и низкая себестоимость. Однако принцип действия устройств этой группы основан на визуальном сравнении яркости излучения объекта с яркостью излучения эталонной нити накаливания, температура которой сравнительно высока. Этот факт определяет диапазон измеряемых температур — $800 \dots 6000$ °С, что значительно выше температурных значений, заданных условиями поставленной задачи.

Преодолеть зависимость диапазона измеряемых температур от температуры эталонного тела позволяет применение энергетических пирометров с приёмниками излучения. В таких пирометрах регистрация характеристик теплового излучения производится не визуально, а автоматически. Соответственно диапазон измеряемых такими устройствами температур определяется характеристиками приёмников излучения.

Конструкции пирометров с приёмниками излучения практически одинаковы и отличаются лишь некоторыми блоками. Таким образом, нам остаётся лишь подобрать конкретные блоки для типового энергетического пирометра в соответствии с условиями поставленной задачи.

В первую очередь необходимо выбрать приёмник излучения, подходящий для измерения низких температур. Приёмники излучения, используемые в пирометрии можно разделить на две группы: термические и фотоэлектрические. Термическими приёмниками излучения служат термобатареи, болометры или элементы Голзя, температура которых повышается при поглощении излучения. Их преимущество состоит в том, что они достаточно чувствительны во всём инфракрасном диапазоне длин волн от $0,75$ до 1000 мкм независимо от длины волны излучения. Недостатком их является относительно большая инерционность. В фотоэлектрических приёмниках излучения (квантовых детекторах) поглощённая фотоэлементом энергия излучения вследствие внешнего фотоэлектрического эффекта выбивает электроны в окружающее пространство. У фото-

резисторов, фотодиодов и фототранзисторов, благодаря внутреннему фотоэффекту, связанные в кристаллической решётке электроны переходят на более высокий энергетический уровень. При этом изменяется проводимость всего элемента или переходного слоя без какого-либо изменения температуры приёмника излучения.

Следует заметить, что для измерения низких температур из всего многообразия приёмников излучения не подходят разве что биметаллические пластины (из-за низкой чувствительности) и пирозлектрические TGS-приёмники, основным элементом которых являются ферроэлектрические кристаллические пластины из триглицинсульфата. Чувствительность таких детекторов постоянна от ультрафиолетового до длинноволнового инфракрасного излучения. Однако такие приёмники применяются только при измерении температур до 50°C , так как при более высоких температурах чувствительность приёмника снижается до нуля в результате деполяризации.

Для измерения температур ниже 500°C в качестве приёмников излучения наиболее целесообразно использовать термобатареи с большим числом последовательно соединённых термопар, болометры, фоторезисторы, фотодиоды и фототранзисторы. Какой из перечисленных приёмников является наиболее подходящим для решения поставленной задачи, нужно определять, исходя из размеров приёмных площадок данных элементов. Приёмные площадки должны иметь минимальные размеры, чтобы измерять температуру микрообъектов. С этой точки зрения наиболее подходящими приёмниками излучения являются полупроводниковые инфракрасные фотодатчики, а также болометры. Благодаря тому, что чувствительная поверхность болометров может быть очень малой, с их помощью можно измерять температуру очень малых объектов, даже имеющих температуру, близкую к комнатной. Кроме того, геометрические размеры болометров могут быть выбраны в зависимости от решаемой задачи.

Ещё более малые размеры приёмной площадки и более высокую чувствительность имеют фоторезисторы, фотодиоды и фототранзисторы. Описанные детекторы отличаются от термопар и болометров более высокой чувствительностью и значительно меньшей постоянной времени. К примеру, фоторезисторы из германия с добавкой индия чувствительны в диапазоне длин волн до 100 мкм и имеют постоянную времени $1 \times 10^{-6}\text{ с}$. Ещё более высокие характеристики имеют фотодиоды, фототранзисторы и инфракрасные фотоэлементы. Чувствительность фотодиодов не зависит от частоты выше 100 Гц , а постоянная времени составляет всего несколько наносекунд. Электроды фотодиодов чаще всего имеют низкое сопротивление, поэтому температуру определяют по падению напряжения на нагрузочном сопротивлении, которое для учёта небольшой температурной зависимости фототока состоит частично из терморезистора. Фототранзисторы имеют меньшую постоянную времени, чем диоды, благодаря меха-

низму усиления, их ёмкость больше, а частотная независимость слабее. Инфракрасные фотоэлементы представляют собой полупроводники с запирающим переходным слоем, у которых при облучении возникает фото-э. д. с. Они действуют как источники тока и не требуют приложения рабочего напряжения. Их преимуществом по сравнению с фотодиодами является отсутствие тока покоя.

Пирометр для измерения низких температур необходимо снабжать модулятором выходного сигнала. Для достижения этой цели измеряемый поток излучения периодически прерывается вращающимся секторным диском или вибрационным модулятором (рис.1). При таком методе измерения очень просто осуществляется компенсация влияния неконтролируемых изменений температуры корпуса пирометра на его выходной сигнал (это влияние велико в пирометрах низких температур).

Для прецизионных измерений целесообразно измерять энергетическую яркость измеряемого объекта и энергетическую яркость дополнительного чёрного опорного излучателя, находящегося в корпусе пирометра, с помощью дифференциальной схемы. В этом случае на приёмник излучения периодически с помощью колеблющегося или вращающегося зеркала подаётся попеременно то излучение от измеряемого объекта, то от опорного излучателя. Тогда выходной сигнал зависит только от разности энергетических яркостей обоих источников. Излучение от стенок корпуса не модулируется, и поэтому при измерении низких температур почти не оказывает влияния на результаты измерения. При прецизионных измерениях низких температур могут возникнуть недопустимо большие помехи из-за отражения излучения корпуса от обратной стороны линзы. Чтобы исключить этот эффект, на пути лучей от опорного излучателя ставится диафрагма, которая отражает такую же часть опорного излучения, зависящую от температуры корпуса.

В условиях нашей задачи достаточно измерять не абсолютную температуру участков поверхности объекта, а разность температур участков поверхности элемента и температуры подложки, на которой находится данный элемент. В этом случае можно температуру опорного излучателя поддерживать равной температуре подложки, тогда выходной сигнал будет пропорционален разности температур визируемого участка плёночного элемента и подложки. Если температуру опорного излучателя не поддерживают постоянной, то при измерении низких температур должен быть предусмотрен датчик для измерения опорной температуры, который воздействует соответствующим образом на компенсационное устройство.

Следующим пунктом выбора является оптическая система пирометра. Как правило, пирометры делятся на рефлекторные, рефракторные и диафрагменные. Так как визируемая область должна иметь очень малые размеры, которые диафрагменные объективы не в состоянии обеспечить в микропирометре применяются рефлекторные и рефракторные объективы.

Рефракторный объектив в таком случае необходимо оснащать наводкой на резкость. Однако лучше всего для микропирометрии использовать зеркальную оптическую систему Кассегрейна.

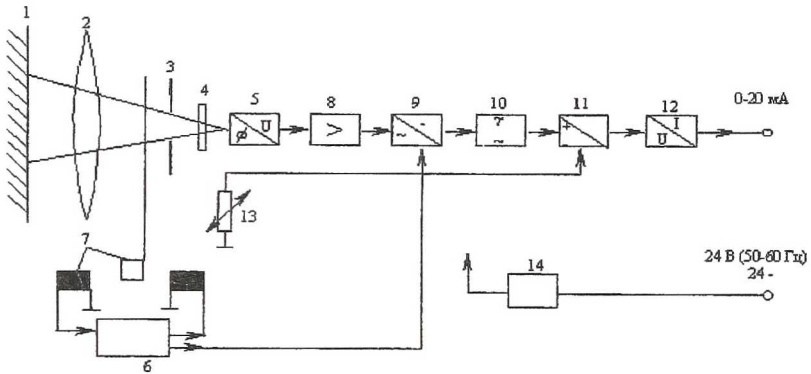


Рисунок 1 – Блок-схема энергетического пирометра излучения с автоматической компенсацией влияния изменения температуры корпуса пирометра:
1 – объект измерения; 2 – линза; 3 – диафрагма; 4 – фильтр; 5 – приёмник излучения; 6 – электронный осциллятор; 7 – вибратор (модулятор); 8 – усилитель; 9 – фазочувствительный выпрямитель; 10 – фильтр низких частот; 11 – блок автоматической компенсации; 12 – преобразователь напряжения в выходной ток; 13 – датчик температуры корпуса пирометра; 14 – блок питания.

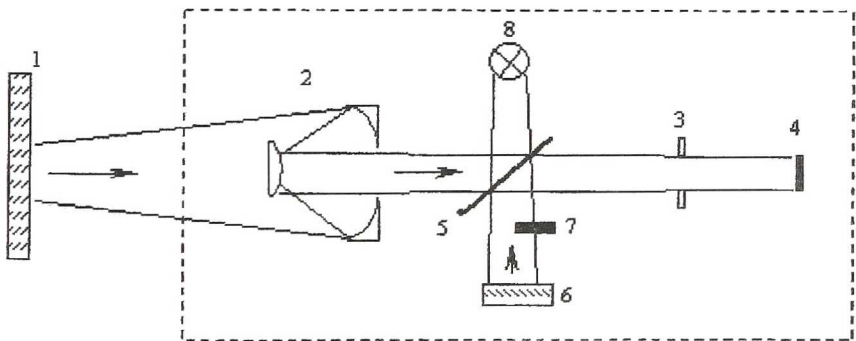


Рисунок 2 – Пирометр излучения с зеркальным объективом Кассегрейна:
1 – объект измерения; 2 – объектив Кассегрейна; 3 – юстировочная диаграмма; 4 – приёмник излучения; 5 – вибрационный модулятор; 6 – опорный излучатель; 7 – диафрагма; 8 – контрольная лампа.

Оптическая система Кассегрейна позволяет измерять температуры очень малых поверхностей. С помощью пирометров на основе индий-сурьмяных приёмников излучения, охлаждаемых жидким азотом и имеющих объектив рефлекторного типа, можно с постоянной погрешностью определять температурные градиенты величиной 0,5 К при 100 °С на объектах, диаметры которых могут быть от 8 до 36 мкм. При этом время

отдельного измерения составляет лишь несколько мкс. Время измерения при помощи микропирометров с вакуумными термоэлектрическими термометрами или болометрами составляет 0,1-0,5 с. С их помощью можно измерять температуры объектов 15 - 400 мкм. Такое различие в размерах объектов измерения связано с различием в размерах приёмников излучения (показатель визирования зависит от диаметра приёмной области).

Кроме того, температура малых объектов может быть определена на большом расстоянии без оптического проецирования через линзу или зеркальный объектив, а с помощью кристаллических стержней из сапфира или с помощью световодов, состоящих из пучка стекловолокон. Лучи выходят из световода под теми же углами, под которыми они входили. Поэтому если один конец световода расположить вблизи объекта измерения, то излучение, выходящее из другого конца, может быть подведено непосредственно к приёмнику излучения пирометра.

С особой внимательностью при изготовлении требуемого пирометра следует отнестись к материалу, из которого изготавливаются элементы оптической системы (линзы, зеркала, фильтры и та далее). Для измерения низких температур чаще всего используют линзы из кварца и флюорита (стекло для этой цели не подходит, так как поглощает значительную часть длинноволнового инфракрасного излучения). Причём наиболее предпочтительно в условиях нашей задачи использовать именно кварц, так как флюорит используется при измерении температур до 50⁰C. То же касается и материала для интерференционных фильтров.

Исходя из всего вышесказанного, можно предложить компоновку наиболее оптимального пирометрического датчика для измерения низких температур микрообъектов. Это непременно должен быть энергетический пирометр полного (в случае применения термических приёмников излучения) либо частичного (в случае применения фотоэлектрических приёмников) излучения. В качестве приёмника излучения в таком пирометре логичнее всего применять какой-либо из полупроводниковых элементов либо болометр с очень малой приёмной площадкой. Пирометр непременно должен быть оснащён модулятором выходного сигнала для компенсации влияния изменений температуры корпуса и опорным излучателем, температуру которого необходимо поддерживать равной температуре подложки. Оптическая система пирометра должна быть непременно рефлекторного типа (оптическая система Кассегрейна) либо рефракторного типа (объектив с максимально большим увеличением), причём оптические элементы системы должны быть изготовлены из расплавленного кварца. Микропирометр кроме всего прочего должен содержать систему визуального наблюдения от источника света и обтюратор с микроприводом. Свет может подаваться по световоду. С той же целью привод обтюратора осуществляется через гибкий вал.